

# การแยกสลายของผสมฟางข้าวและถ่านหิน ด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

## Thermal Decomposition of Straw and Coal Blends Using Microwave Radiation

โปรดปราน สิริธีรศาสน์\*, ณัฐพล ช่างการ และศรัณย์ ชโนวิทย์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Prodpran Siritheerasas\*, Natthaphon Changkarn and Saran Chanovit

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Centre,

Klong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแยกสลายของผสมระหว่างฟางข้าวกับถ่านหินด้วยความร้อนโดยใช้คลื่น microwave โดยศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ อันได้แก่ สัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหิน (100:0, 90:10, และ 50:50) ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่าง [ร้อยละ (โดยน้ำหนัก) 27 และ 37] เวลาของการให้ความร้อน (10-25 นาที) และ กำลังของคลื่นไมโครเวฟ (350-700 วัตต์) ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน อันได้แก่ solid yield ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (solid product หรือ char) ที่ได้ จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหินและกำลังของคลื่นไมโครเวฟ มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า solid yield โดย solid yield มีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 30-60 ทั้งนี้ เวลาของการให้ความร้อนที่นานขึ้น ส่งผลให้ค่า solid yield มีแนวโน้มลดลง แต่ solid yield มีค่าสูงขึ้น เมื่อตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น สัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหิน เวลาของการให้ความร้อน และกำลังของคลื่นไมโครเวฟ มีผลน้อยมากต่อผลการวิเคราะห์แบบประมาณของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน ทั้งนี้พบว่าตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีสัดส่วนของสารระเหยได้ (volatile matter) ลดลง ขณะที่สัดส่วนของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) มากขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 37 มีผลทำให้ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) ในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ลดลง เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่า

ประมาณ 14-15 MJ/kg ทั้งนี้พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มีแนวโน้มลดลง และพบว่าเมื่อทำการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเวลาที่นานขึ้น ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** ชีวมวล, ถ่านหิน, การแยกสลายด้วยความร้อน, ไมโครเวฟ, ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ, ค่าความร้อน

## Abstract

This research aimed to study the thermal decomposition of straw and coal blends using microwave radiation as a heating medium. The effects of straw/coal ratio (100:0, 90:10, and 50:50), initial moisture content of the sample (27 and 37 wt. %), heating period (10-25 min), and microwave power (350-700 Watts) on solid yield and characteristics of the resulting solid products (chars), including proximate analysis and heating value, were investigated. It was found, from the experiments, that the straw/coal ratio and microwave power had insignificant effects on solid yield, which was found to be within the range of 30-60 %. An increase in heating period resulted in a decrease in solid yield. However, when sample's initial moisture content was increased from 27 to 37 wt. %, solid yield was found to increase. Straw/coal ratio, heating time, and microwave power had negligible effects on proximate analysis of the resulting solid products. When compared to the samples before passing through the thermal decomposition process, the portion of volatile matter in the resulting solid chars was found to decrease, whereas the portion of fixed carbon was found to increase. However, an increase in initial moisture content of the sample led to an increase in volatile matter, but a decrease in fixed carbon, of the resulting solid products. The heating values of the resulting solid chars were in the range of 14-15 MJ/kg. It was also found that, when the initial moisture content of the sample was increased, the heating values of solid products decreased, and that the heating values of the resulting solid chars increased with an increase in the heating period.

**Key words:** biomass, coal, pyrolysis, microwave, proximate analysis, heating value

## 1. บทนำ

พลังงานจากชีวมวล (biomass) เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน โดยมีเหตุผลหลัก ๆ คือ เป็นพลังงานที่สะอาด ก่อให้เกิดมลพิษในระหว่างการใช้งานต่ำ และสามารถหาได้ภายในประเทศ [1-3] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่มีค่าความร้อน (heating value) ต่ำ และมีความชื้น (moisture)

และสารระเหยได้ (volatile matter) สูง ซึ่งก่อให้เกิดเขม่าและควันสูง โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเผาไหม้ [3] จึงยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยหากจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพเสียก่อน

นอกจากชีวมวลแล้ว ประเทศไทยมีถ่านหินอยู่ในปริมาณสูง [4] แต่มีปริมาณการใช้ที่ค่อนข้างต่ำ

(ประมาณร้อยละ 15 ในปี พ.ศ. 2554 [4]) ซึ่งเหตุผลหลักน่าจะมาจากการที่ถ่านหิน โดยเฉพาะถ่านหินที่พบในประเทศไทย มักจะมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ [5] เมื่อเผาไหม้จะปล่อยมลพิษออกมาในรูปของออกไซด์ของกำมะถัน ( $SO_x$ ) จึงทำให้เกิดการต่อต้านการนำถ่านหินมาใช้งานในรูปของพลังงาน [5,6]

ดังนั้น เพื่อทำให้การใช้พลังงานจากชีวมวลและถ่านหินในประเทศที่มีปริมาณสูงขึ้น อันจะนำไปสู่การลดลงของการนำเข้าพลังงานหรือเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ จึงควรมีปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลและถ่านหิน เพื่อให้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น และมีความชื้นและสารระเหยที่ลดลง อีกทั้งยังควรนำถ่านหินไปผสมกับชีวมวล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่ำ [1,2] เพื่อลดมลพิษที่จะเกิดจากการใช้งานเชื้อเพลิงผสมดังกล่าว

ทั้งนี้ การปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลและถ่านหินสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความเหมาะสมที่จะใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวล ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงแข็งอื่น ๆ [6-10]

อนึ่ง การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงแข็งด้วยการแยกสลายด้วยความร้อน โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ที่ใช้ยูเคิม (conventional heating technique) เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานสูง อีกทั้งต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง และมีใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น [9,10] ดังนั้น จึงควรหาเทคนิคในการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงแข็งโดยใช้อุปกรณ์ที่ราคาไม่แพง สามารถหาได้ทั่วไป และใช้พลังงานที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งเทคนิคหนึ่งที่ทำให้สามารถให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงแข็งจนเกิดการย่อยสลาย (decomposition) โดยใช้พลังงานที่ต่ำและใช้อุปกรณ์ที่

สามารถหาได้ทั่วไปคือการใช้พลังงานจากคลื่น microwave [9-11] อย่างไรก็ตาม ที่ผ่านมามีพบว่ามีวิจัยทางด้านนี้ไม่มากนัก โดยเฉพาะการใช้คลื่นไมโครเวฟในการแยกสลายด้วยความร้อนของผสมระหว่างชีวมวลและถ่านหิน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการแยกสลายของผสมระหว่างชีวมวลและถ่านหินด้วยความร้อนโดยใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ อันได้แก่ สัดส่วนของชีวมวลต่อถ่านหิน ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่าง เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อน และกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อค่า solid yield ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (solid product หรือ char) ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เตาไมโครเวฟที่ใช้อยู่ทั่วไปในครัวเรือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (หรือแหล่งให้ความร้อน) เนื่องจากต้องการให้การแยกสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition) สามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพง และสามารถหาได้ทั่วไป

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ฟางข้าว (จาก จ. ปทุมธานี) เป็นตัวแทนของชีวมวล เนื่องจากฟางข้าวเป็นชีวมวลจำพวกกากผลิตภัณฑ์จากการเกษตร (agricultural waste) ที่มีอยู่อย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยจากข้อมูลปี พ.ศ. 2554 พบว่าศักยภาพเชิงพลังงานของฟางข้าวคิดเป็นประมาณ 12,500,000 ตัน เทียบเท่านั้นมันดิบ สูงที่สุดในบรรดาชีวมวลของแข็งที่นำมาใช้เป็นพลังงาน [4] ส่วนถ่านหินนั้น ใช้เศษถ่านหิน

(coal waste) หรือถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ ที่ได้จากเหมืองแม่เมาะ จ. ลำปาง ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ปริมาณกำมะถัน (sulphur content) และค่าความร้อน (heating value) ของฟางข้าวและถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ปริมาณกำมะถันและค่าความร้อนของฟางข้าวและถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัย

| รายการวิเคราะห์              | ฟางข้าว | ถ่านหิน |
|------------------------------|---------|---------|
| การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt.%) |         |         |
| ความชื้น                     | 7.18    | 20.09   |
| เถ้า                         | 13.53   | 25.87   |
| สารระเหยได้                  | 60.85   | 34.87   |
| คาร์บอนคงตัว                 | 18.44   | 19.17   |
| ปริมาณกำมะถัน (wt.%)         | น้อยมาก | 1.76    |
| ค่าความร้อน (MJ/kg)          | 11.57   | 9.54    |

## 2.1 ขั้นตอนการทดลอง

2.1.1 บดตัวอย่างฟางข้าวและถ่านหินจนมีขนาดประมาณ 0.2 mm โดยใช้เครื่องบดแบบใบมีด (ยี่ห้อ Janke & Kunkel GmbH รุ่น M20) จากนั้นเก็บตัวอย่างที่บดแล้วไว้ในถุงพลาสติก

2.1.2 แบ่งตัวอย่างฟางข้าวและถ่านหินไปทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 วิเคราะห์หาค่าความร้อน (heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D5865 และวิเคราะห์ปริมาณกำมะถัน ตามมาตรฐาน ASTM D3177

2.1.3 ผสมตัวอย่างฟางข้าวและถ่านหินในภาชนะที่ทำจากเซรามิกทนไฟ (ceramic porcelain)

ให้มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ฟางข้าว:ถ่านหิน 3 ค่า คือ 100:0 (ฟางข้าวทั้งหมด), 90:10 และ 50:50

2.1.4 นำตัวอย่างที่ได้จากการผสมในข้อ

2.1.3 เข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบ นำเข้า desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น

2.1.5 เติมน้ำ (อย่างช้า ๆ) ลงบนตัวอย่างในปริมาณที่ได้คำนวณไว้แล้ว จนของผสมมีความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ (โดยน้ำหนัก) 27 หรือ 37

2.1.6. ปิดฝาภาชนะด้วยแผ่นกระเบื้องเซรามิก (ceramic tile) เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวอย่างในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งน้ำหนัก และนำเข้าเครื่องไมโครเวฟแบบที่ใช้ทั่วไปในครัวเรือน (ยี่ห้อ Sharp รุ่น Carousel R3V16A) โดยปรับค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟไว้ที่ 350, 490 หรือ 700 วัตต์

2.1.7 เมื่อทำการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนครบ 10, 15, 20 หรือ 25 นาที นำภาชนะออกจากเครื่องไมโครเวฟ ทิ้งไว้ให้เย็น (โดยยังคงปิดฝาทิ้งไว้)

2.1.8 ชั่งน้ำหนักของภาชนะหลังการให้ความร้อน โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า solid yield โดยที่ค่าร้อยละของ solid yield สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\text{Solid yield (\%)} = \frac{\text{Mass of a solid product after pyrolysis}}{\text{Initial mass of a sample}} \times 100$$

2.1.9 นำตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน ไปวิเคราะห์แบบประมาณและวิเคราะห์หาค่าความร้อนด้วยวิธีการเดียวกับข้อ 2.1.2

## 3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

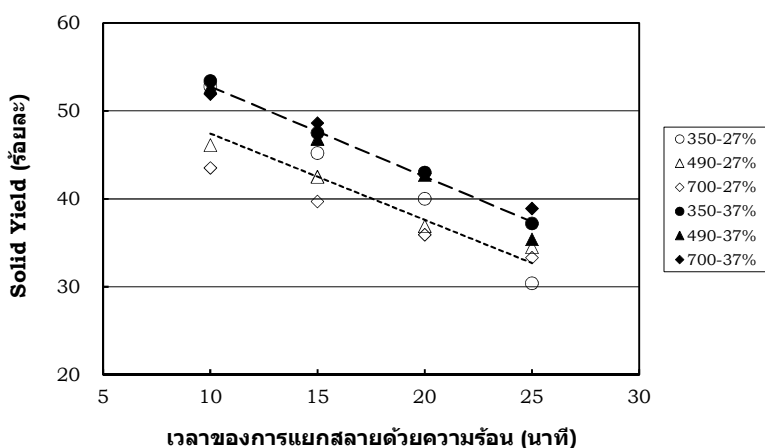
### 3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าวและถ่านหิน

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าวและถ่านหินแสดงในตารางที่ 1 พบว่าฟางข้าวมีปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) สูงถึงประมาณร้อยละ 60

และมีสัดส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustibles) อันได้แก่ สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ต่อส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (incombustibles) ซึ่งได้แก่ ความชื้น (moisture) และเถ้า (ash) ประมาณร้อยละ 20 ต่อ 80 และมีค่าความร้อน (heating value) สูงกว่าถ่านหิน ซึ่งมีสัดส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ต่อส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ประมาณร้อยละ 55 ต่อ 45 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกำมะถันในฟางข้าวมีปริมาณน้อยมาก ขณะที่ปริมาณกำมะถันในถ่านหินมีค่าประมาณร้อยละ 1.8

### 3.2 Solid yield ของการแยกสลายด้วยความร้อน

การวิจัยพบว่าค่า solid yield ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนของผสมฟางข้าวและถ่านหิน มีค่าประมาณร้อยละ 30-60 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นผลการทดลองสำหรับของผสมฟางข้าวและถ่านหิน ในอัตราส่วน 90:10 โดยพบว่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟ (350-700 วัตต์) มีผลเล็กน้อยต่อค่า solid yield ขณะที่เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนที่นานขึ้นมีผลทำให้ค่าของ solid yield ลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น (จากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 37) solid yield มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 ค่า solid yield ของการแยกสลายของผสมฟางข้าวและถ่านหิน (ที่สัดส่วน 90:10) ด้วยความร้อน ที่เวลาการให้ความร้อน กำลังของคลื่นไมโครเวฟ (350-700 วัตต์) และความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ (ร้อยละ 27 และ 37)

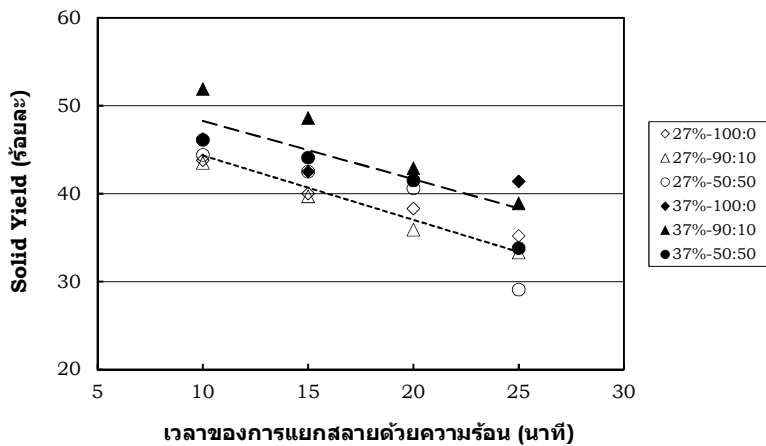
เมื่อเปรียบเทียบค่า solid yield ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ซึ่งใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ในการให้ความร้อน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟในช่วง 350-700 วัตต์ เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกสลายด้วยความร้อนเช่นเดียวกับการแยกสลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นใน muffle furnace

เมื่อพิจารณาผลของเวลาของการแยกสลายด้วยความร้อน พบว่าเวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนที่นานขึ้นส่งผลให้ค่า solid yield มีค่าลดลง หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเมื่อทำการให้ความร้อนด้วยเวลาที่นานขึ้น ส่งผลให้สารระเหยได้ (volatile matter) ถูกขับออกมามากขึ้นหรือมี gas yield เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากข้อเท็จจริงที่ว่า

เมื่อทำการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยเวลาที่นานขึ้น โมเลกุลภายในตัวอย่างของผสมฟางข้าวและถ่านหินเกิดการสั่นมากขึ้น ทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงสามารถขับสารระเหยได้ออกมาได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างมีค่าสูงจะส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลภายในตัวอย่างส่วนหนึ่งต้องใช้ในการระเหยน้ำหรือความชื้นออกจากตัวอย่างมากขึ้น ทำให้ความร้อนที่จะไปทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้นมีปริมาณน้อยลง และเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่าง

ลดลง ความสามารถในการขับสารระเหยได้จึงลดลงหรือทำให้มี gas yield ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้มีส่วนที่เป็นของแข็งเหลืออยู่ในตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น หรือทำให้ solid yield เพิ่มขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้เมื่อความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 37 ค่าเฉลี่ยของค่า solid yield ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนที่กำลังคลื่นของไมโครเวฟต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจากประมาณร้อยละ 40 เป็นประมาณร้อยละ 45 ดังแสดงในรูปที่ 2 หรือเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12



รูปที่ 2 ค่า solid yield ของการแยกสลายของผสมระหว่างฟางข้าวและถ่านหิน (ที่มีสัดส่วน 100:0, 90:10 และ 50:50) ด้วยความร้อน ที่เวลาของการให้ความร้อนในช่วง 10-25 นาที กำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 วัตต์ และความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ

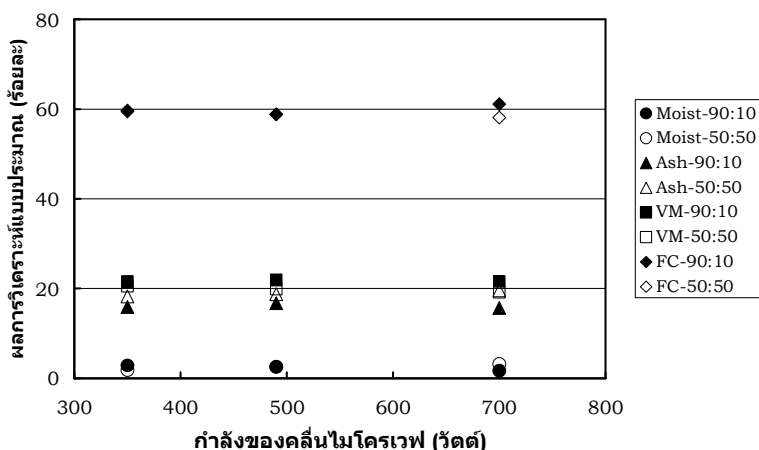
เมื่อพิจารณาค่า solid yield ของการแยกสลายด้วยความร้อนของผสมระหว่างฟางข้าวและถ่านหินในสัดส่วนต่าง ๆ (100:0, 90:10 และ 50:50) ในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 700 วัตต์ พบว่าสัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหินแทบจะไม่มีผลต่อค่า solid yield แต่อย่างใด

### 3.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน

เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37 และผ่านการแยกสลายด้วยความร้อนเป็นเวลา 25 นาที ด้วยสัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหินและกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่าง ๆ แบบประมาณ (proximate analysis) ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า

สัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหิน 2 ค่า คือ 90:10 และ 50:50 และกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 490 และ 700 วัตต์ มีผลน้อยมากต่อผลการวิเคราะห์แบบประมาณของตัวอย่างที่ได้จากการ

แยกสลายด้วยความร้อน ทั้งนี้ผลการทดลองที่เวลาการแยกสลายด้วยความร้อนอื่น ๆ (ในช่วง 10-20 นาที) และที่ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างร้อยละ 27 ก็ให้ผลการทดลองในลักษณะที่คล้ายคลึงกันนี้



**รูปที่ 3** ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37 และสัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหินเท่ากับ 90:10 และ 50:50 ที่ผ่านการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่าง ๆ ที่เวลา 25 นาที

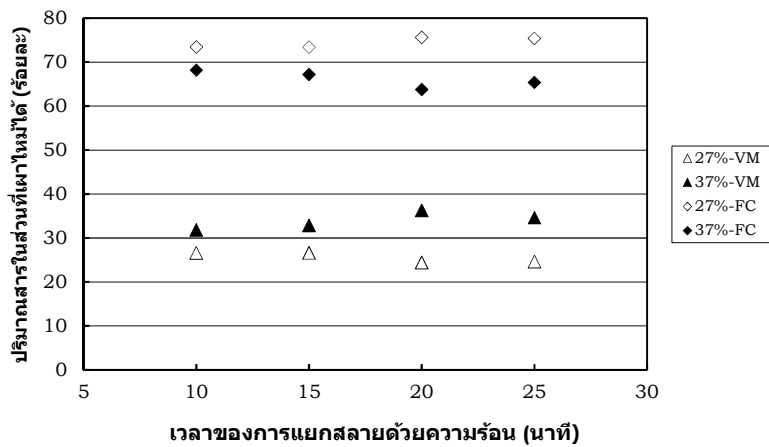
ทั้งนี้ปริมาณความชื้น (moisture) เถ้า (ash) สารระเหยได้ (volatile matter, VM) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon, FC) ของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 2-4, 15-20, 19-22 และ 58-62 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมวลของตัวอย่างตอนเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเถ้าในตัวอย่างยังคงมีปริมาณเท่าเดิม เมื่อเทียบกับปริมาณของเถ้าในตัวอย่างก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน (ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 14-20) ส่วนปริมาณความชื้นและสารระเหยได้มีค่าลดลง ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้การที่ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ มีปริมาณสารระเหยได้ลดลง และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น

แสดงว่าตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีสมบัติเชิงความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำย่อมแสดงถึงการมีสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงที่ดี [5] และโดยเฉลี่ยแล้วสารระเหยได้มีค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าของคาร์บอนคงตัว [13] เมื่อตัวอย่างมีสัดส่วนของส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ค่าความร้อนของตัวอย่างจึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่เผาไหม้ได้เท่านั้น นั่นคือพิจารณาเฉพาะส่วนของสารระเหยได้ (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC) หรือแบบ dry and ash-free (daf) basis ของตัวอย่างที่มีสัดส่วนของฟางข้าวต่อถ่านหิน 90:10 และความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 27 และ 37 ที่ผ่านการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเวลา

10-25 นาที และกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนมีผลน้อยมากต่อปริมาณสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างที่ได้ ทั้งนี้พบว่าปริมาณของสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัว (daf basis) ของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่าประมาณร้อยละ 25-35 และ 65-75 ตามลำดับ เทียบกับปริมาณของสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัว

(daf basis) ของตัวอย่างก่อนการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีค่าประมาณร้อยละ 72-77 และ 23-28 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าสัดส่วนของสารระเหยได้ในตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่าลดลงประมาณ 2-3 เท่า เมื่อเทียบกับปริมาณสารระเหยได้ในตัวอย่างก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน ขณะที่สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3-3.3 เท่า



รูปที่ 4 ปริมาณสารระเหยได้ (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC) [dry & ash-free (daf) basis] ในตัวอย่างของผสมฟางข้าวและถ่านหินที่มีสัดส่วน 90:10 และความชื้นร้อยละ 27 และ 37 ที่ผ่านการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเวลาต่าง ๆ ที่กำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 วัตต์

อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยได้ในตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 เช่นเดียวกัน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ปริมาณสารระเหยได้ที่เหลืออยู่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น น่าจะเนื่องมาจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อตัวอย่างมีความชื้นสูงขึ้น ต้องมีการใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการขับความชื้นออกจากตัวอย่าง ทำให้เหลือความร้อนที่ต้องใช้

สำหรับการขับสารระเหยได้ออกจากตัวอย่างลดลง ซึ่งเหตุผลนี้สอดคล้องกับคำอธิบายสำหรับผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2 ที่ว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างสูงขึ้น ปริมาณสารระเหยได้ที่ถูกขับออกมาเป็น gaseous product ลดลง (นั่นคือ มี gas yield ลดลง) จึงเหลืออยู่ในตัวอย่างมากขึ้น และเนื่องจากคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เป็นของแข็ง จึงไม่ถูกขับออกมาในระหว่างการแยกสลายด้วยความร้อน ทำให้มีปริมาณค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเมื่อปริมาณของสารระเหยได้ที่เหลืออยู่ในตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น



ในขณะที่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวมีค่าคงที่ สัดส่วนของส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนในงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ซึ่งใช้ muffle furnace ที่มีกำลัง (power) ประมาณ 5,000 วัตต์ และใช้เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อน 80 นาที แสดงให้เห็นว่าการแยกสลายด้วยความร้อนโดยการใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟ ที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าถึงกว่า 7 เท่า (700 วัตต์ เทียบกับ 5,000 วัตต์) และใช้เวลาของการให้ความร้อนน้อยกว่า (25 นาที เทียบกับ 80 นาที) สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อคิดเป็นหน่วย (unit) ของไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน พบว่าการแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้เตาไมโครเวฟ ใช้หน่วย (unit) ของไฟฟ้าน้อยกว่าการแยกสลายด้วยความร้อนที่ใช้ muffle furnace ถึงกว่า 20 เท่า (ประมาณ 0.30 kW-h เมื่อใช้เตาไมโครเวฟ เทียบกับ 6.7 kW-h เมื่อใช้ muffle furnace) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [9,10] ที่พบว่าการแยกสลายด้วยความร้อน โดยใช้เตาไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการแยกสลายด้วยความร้อน โดยใช้เตาเผาแบบเดิม (conventional muffle furnace) แต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติไม่แตกต่างกัน อนึ่งการใช้เตาไมโครเวฟมีข้อเสียเปรียบ muffle furnace ตรงที่สามารถทำการแยกสลายด้วยความร้อนต่อครั้งได้ในปริมาณที่น้อยกว่า

### 3.4 ค่าความร้อนของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน

เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value)

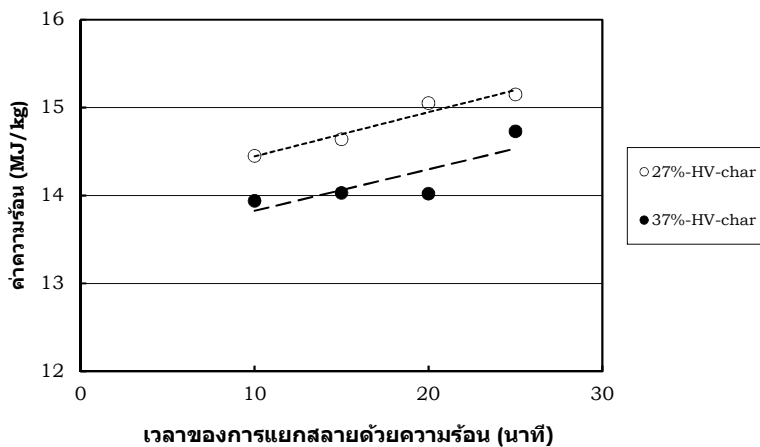
ของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็ง (solid product หรือ char) ของตัวอย่างของผสมฟางข้าวและถ่านหินที่มีสัดส่วน 90:10 และมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 27 และ 37 ที่ผ่านการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเวลา 10-25 นาที ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 วัตต์ พบว่ามีค่าประมาณ 14-15 MJ/kg ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของตัวอย่างก่อนการแยกสลายด้วยความร้อนประมาณร้อยละ 35-40 อันเป็นการแสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงความร้อน (thermal properties) ที่ดีขึ้น ทั้งนี้ค่าความร้อนของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อน (ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 14-15 MJ/kg) มีค่าใกล้เคียงค่ากับค่าความร้อนของไม้พืนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้มในครัวเรือน ซึ่งมีค่าประมาณ 15 MJ/kg [4]

นอกจากนี้ จากรูปที่ 5 พบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็งของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 27 มีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็งของตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37 ประมาณร้อยละ 5 (ค่าเฉลี่ยประมาณ 15 MJ/kg สำหรับความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 27 เทียบกับ 14 MJ/kg สำหรับความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีคาร์บอนคงตัวในสัดส่วนที่ลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 4) และเนื่องจากคาร์บอนคงตัวมีความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูงกว่าสารระเหยได้ [13] ดังนั้นเมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ค่าความร้อนของส่วนที่เป็นของแข็งที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนจึงมีแนวโน้มลดลง

อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

ส่วนที่เป็นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนที่นานขึ้น สาร ระเหยได้จะถูกขับออกจากตัวอย่างมากขึ้น ขณะที่ คาร์บอนคงตัวมีปริมาณค่อนข้างคงที่ เนื่องจากไม่ได้ ถูกขับออกมา จึงทำให้สัดส่วนของส่วนที่เป็นสาร

ระเหยได้ลดลง หรือสัดส่วนของส่วนที่เป็นคาร์บอน คงตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อตัวอย่างมีส่วนที่เป็นคาร์บอนคง ตัวเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของตัวอย่างจึงมีค่าสูงขึ้น ด้วย เหตุผลที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 5 ค่าความร้อน (heating value) ของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็ง (solid product หรือ char) ของตัวอย่าง ของผสมฟางข้าวและถ่านหินที่มีสัดส่วน 90:10 และความชื้นร้อยละ 27 และ 37 ที่ผ่านการแยกสลายด้วย ความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 วัตต์

#### 4. สรุป

ผลการวิจัยที่ได้สามารถสรุปได้ ดังนี้

4.1 สัดส่วนของชีวมวล (ฟางข้าว) ต่อถ่านหิน และกำลังของคลื่นไมโครเวฟ มีผลน้อยมากต่อค่า solid yield ของการแยกสลายด้วยความร้อน โดยค่า solid yield ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30-60

4.2 เมื่อเพิ่มเวลาของการแยกสลายด้วยความ ร้อน ค่า solid yield ที่ได้มีแนวโน้มลดลง หรือกล่าว ได้อีกนัยหนึ่งว่า เมื่อเพิ่มเวลาของการแยกสลายด้วย ความร้อน ส่วนที่เป็นสารระเหยได้ (volatile matter) หรือผลิตภัณฑ์ก๊าซ (gaseous product) ที่ถูกขับออก จากตัวอย่างมีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นคือมี gas yield เพิ่ม

ขึ้นนั่นเอง

4.3 ความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นส่งผล ให้ค่า solid yield เพิ่มขึ้น หรือ gas yield ลดลง หรือ ความชื้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถขับสารระเหย ได้ออกมาได้น้อยลง

4.4 เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนและ กำลังของคลื่นไมโครเวฟมีผลเล็กน้อยต่อปริมาณสาร ระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ของ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการการแยกสลายด้วยความร้อน ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสัดส่วนของส่วนที่เป็นสาร ระเหยได้ลดลง ขณะที่มีส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้น

4.5 ค่าความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 37 มีผลทำให้สัดส่วนของสารระเหยได้เพิ่มขึ้น แต่ทำให้สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวลดลง

4.6 ปริมาณสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่างที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้คลื่น microwave ที่มีกำลังอยู่ในช่วง 350-700 วัตต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้ muffle furnace ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าประมาณ 5,000 วัตต์

4.7 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็ง (solid product หรือ char) ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนของตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 27 มีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37 และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาของการแยกสลายด้วยความร้อนที่นานขึ้น โดยที่ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่าประมาณ 14-15 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความร้อนของไม้ปื้นที่ใช้ในการหุงต้มในครัวเรือนที่มีค่าประมาณ 15 MJ/kg

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช และ รศ.ดร.วิษณุ มีอยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาในด้านไมโครเวฟ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร ทิพยาวงศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล, 2553, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 234 น.
- [2] Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y. and Tsubaki, N., 2007, Biosyngas production from biomass catalytic gasification, Energy Convers. Manag. 48: 1132-1139.
- [3] Chum, H.L. and Overend, R.P., 2001, Biomass and renewable fuels, Fuel Process. Technol. 71: 187-195.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, รายงานพลังงานของประเทศ ไทย 2554, กระทรวงพลังงาน, 32 น.
- [5] กัญญา บุญยเกียรติ, 2544, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 376 น.
- [6] Miller, B.G., 2011, Clean Coal Engineering Technology, 2nd Ed., Elsevier, Inc., USA, 681 p.
- [7] Berkowitz, N., 1994, An Introduction to Coal Technology, 2nd Ed., Academic Press, Inc., USA, 398 p.
- [8] Bernardo, M., Goncalves, M., Lapa, N., Barbosa, R., Mendes, B. and Pinto, F., 2012, Characterization of chars produced in the co-pyrolysis of different wastes: Decontamination study, J. Hazard. Mater. 207-208: 28-35.
- [9] Dominguez, A., Menendez, J.A., Inguanzo, M. and Pis, J.J., 2006, Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating, Biores. Technol. 97: 1185-1193.

- [10] Menendez, J.A., Inguanzo, M. and Pis, J.J., 2001, Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Res.* 36: 3261-3264.
- [11] Simsek, E.H., Karaduman, A. and Togrul, T., 2002, The effect of moisture on the liquefaction of some Turkish coals in Tetralin with microwave energy, *Energy Sources* 24: 675-684.
- [12] Siritheerasas, P., Boonsomlanjit, B. and Kochasenee, V., 2004, Low-temperature carbonisation of saw-dust, p. TN-7, 14th National Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, Bangkok.
- [13] Klass, D.B., 1998, *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals*, Academic Press, Inc., USA, 651 p.